

**АНАЛИЗ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ
С УЧЕТОМ НЕИДЕАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ****О.Г.Шерстнева****TELECOMMUNICATION NETWORK ANALYSIS
WITH INCOMPLETE RELIABILITY CONTROL SYSTEMS****O.G.Sherstneva***Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск,
sherstneva@ngs.ru*

Сформулированы задачи анализа телекоммуникационных сетей в условиях неидеальной надежности системы контроля ее работоспособности. Разработан ряд математических моделей функционирования сетевого элемента с учетом процессов отказа и восстановлений сетевых элементов. Математические модели разделены на два типа. Модели первого типа включают состояния сетевого элемента, фиксируемые в процессе восстановления. Модели второго типа отражают внутрисистемные функции в процессе эксплуатации. Получены формулы для расчета коэффициента простоя и среднего времени недоступности пропуска трафика по выделенной линии связи. Исходные параметры систематизированы и классифицированы по признаку принадлежности к расчетным или эксплуатационным показателям. Предложен вариант решения сформулированных задач, основу которого составляет совместное рассмотрение расчетных показателей и статистических данных системы сетевого мониторинга. Предложена программная реализация выполненных теоретических выкладок. Выявлены зависимости значений показателей надежности от вероятности ошибок системы контроля. Построены графики зависимости для разных значений исходных и эксплуатационных параметров.

Ключевые слова: анализ, математическая модель, граф состояний, надежность, параметры надежности, эксплуатационные параметры, сетевой элемент

Для цитирования: Шерстнева О.Г. Анализ телекоммуникационной сети с учетом неидеальной надежности системы контроля // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №4(125). С.108-113. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).108-113](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).108-113)

The article is based on the tasks of telecommunication networks analysis in terms of incomplete reliability conditions in monitoring system performance. A number of mathematical models for network element functioning have been developed taking into account failure processes and restoration of network elements (NE). Mathematical models have been divided into two types. Models of the first type include the states of NE that are captured during the recovery process. Models of the second type reflect intrasystem functions during operation. Equations for estimation of the downtime ratio and average time of traffic transmission unavailability over a dedicated communication line have been obtained. The initial parameters have been systematized and classified according to calculated or operational indicators. An option for solving the problems is proposed on the basis of joint consideration of estimated parameters and statistical data in the network monitoring system. A software implementation of performed theoretical calculations is proposed. Dependences of reliability indicators values and the probability of errors in the control system have been revealed. Dependency graphs for different values of initial and operational parameters have been built.

Keywords: analysis, mathematical model, state graph, reliability, reliability parameters, operational parameters, network element

For citation: Sherstneva O.G. Telecommunication network analysis with incomplete reliability control systems // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №4(125). P.108-113. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).108-113](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).108-113)

Введение

В настоящее время инфокоммуникационные системы занимают лидирующее положение в процессе развития практически всех отраслей экономики. Само понятие инфокоммуникационные системы включает совокупность различного коммуникационного оборудования, начиная от средств связи источников и потребителей информации до телекоммуникационных систем, сетей связи, их программного обеспечения и сопутствующих технических и программных средств. На рынке телекоммуникаци-

онных услуг предоставляется широкий спектр оборудования как отечественных, так и зарубежных производителей. Существующая конкуренция обязывает поставщиков телекоммуникационных услуг искать все новые аргументы для продвижения своей продукции. Маркетинговые коммуникации в этом случае играют немаловажную роль. Основным фактором при выборе потребителем телекоммуникационных услуг является соотношение «цена-качество». Качество предоставления телекоммуникационных услуг во многом определяется качеством функционирования самой системы, например доступностью,

бесперебойностью, удобством пользования, полной предоставляемой услуги. И если удобство пользования и полнота услуги осуществляются с помощью специализированного программного обеспечения, то доступность и бесперебойность функционирования системы обеспечивается ее надежностью, т.е. системой показателей, отвечающих за работоспособность и пропуск трафика. Основным показателем надежности является коэффициент готовности. Но поскольку коэффициент готовности является сложным показателем, включающим ряд параметров, характеризующих готовность отдельных составляющих системы, то его расчет требует составления математической модели функционирования компонентов телекоммуникационной системы именно с точки зрения надежности. При составлении математической модели нужно учитывать процессы отказов и восстановлений с учетом того, что отдельные компоненты системы, телекоммуникационные узлы и линии связи не являются идеально надежными. Такой подход позволит выполнить исследование взаимовлияния надежности сетевых компонентов и систем управления, представляющих систему сетевого мониторинга и систему эксплуатации. Под эксплуатацией понимается комплекс мероприятий, проводимых по задачам текущего и оперативного управления системой [1,2]. Мероприятия выполняются на нормально функционирующем оборудовании и включают в себя работу с абонентскими и соединительными линиями связи, управление трафиком, маршрутизацией, организацию измерений. Таким образом, надежность инфокоммуникационной системы и сетей связи определяется значениями показателей, полученными от системы мониторинга и контроля. Однако и сама система контроля требует оценки ее надежности.

Постановка задачи

При современных системах сетевого мониторинга сбор статистических данных не представляет никакой сложности. По этим данным можно легко вычислить такие показатели, как интенсивность поступления вызовов, интенсивность обслуженных вызовов, интенсивность отказов в обслуживании, и определить причину отказов, и многие другие показатели, позволяющие дать оценку качества работы сети с целью совершенствования системы управления отношениями с клиентами. Однако невозможно повысить эту оценку без детального рассмотрения работы отдельных элементов сети с точки зрения надежности. В связи с этим предложена математическая модель, отражающая внутрисистемные функции в процессе эксплуатации сетевого элемента (рис.1). Модель представлена как граф возможных состояний. В качестве сетевого элемента (СЭ) здесь рассматривается линия связи. За основу графа взяты два состояния СЭ: работоспособное (Р) и неработоспособное (Н). В модели учитываются и параметры системы управления, представленной в виде системы контроля за работоспособностью отдельно взятого сетевого элемента. Первоначально считаем, что система контроля идеально надежна.

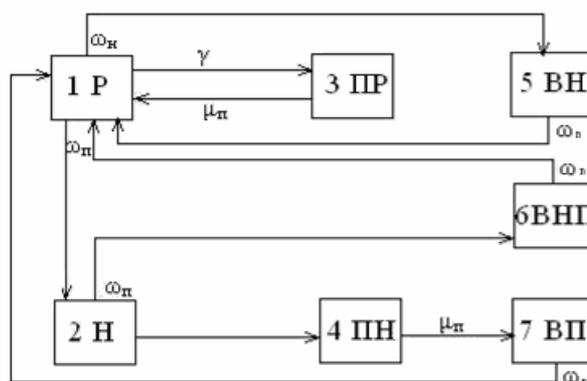


Рис.1. Граф состояний СЭ

Состояние восстановления неработоспособного СЭ разделено на три состояния: ВН — отказ обнаружен системой непрерывного контроля, ВП — отказ обнаружен системой периодического контроля, ВНП — на восстановлении находится СЭ, в котором имеют место два отказа, обнаруживаемые разными видами контроля. Соответственно, в отдельные состояния выделены и состояния проверки работоспособного СЭ (ПР) и неработоспособного СЭ (ПН). Переходы между состояниями введены в соответствии с выделенными состояниями СЭ и определены через интенсивности отказов (ω_H, ω_P) и восстановления (ω_B), интенсивность проведения периодической проверки (γ) и ее завершения (μ_P).

Интерес представляет расчет коэффициента простоя (K_P), который здесь представлен как коэффициент недоступности к сетевым ресурсам, и среднего времени простоя СЭ (t_H).

Для вычисления этих параметров использовался метод относительных частот [3]. Расчетные формулы:

$$K_P = \frac{\omega_B \omega_P + \omega_0 (\omega_H + \gamma)}{\omega_H (\omega_0 + \gamma) + \omega_0 (\omega_H + \gamma)};$$

$$t_H = \frac{\omega_P}{\omega_0 (\omega_H + \gamma)}.$$

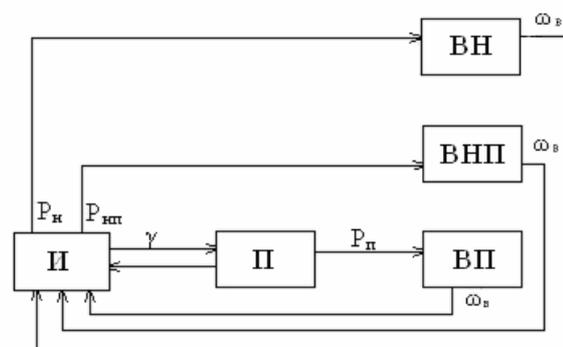


Рис.2. Граф состояний СЭ наблюдаемых событий

Однако в процессе эксплуатации наблюдаются и фиксируются системой контроля другие состояния

сетевого элемента. Математическая модель, также представленная в виде графа состояний, отражающих процесс восстановления, показана на рис.2.

При восстановлении СЭ также наблюдаются три состояния, соответствующие принятой системе контроля и аналогичные графу рис.1. Однако переходы в соответствующие состояния определены через вероятности P_H , P_{II} , P_{HII} и оцениваются по статистическим данным.

Задача заключается в том, чтобы через известные эксплуатационные параметры определить реальные значения K_{II} и t_H . Если принять во внимание, что система контроля является системой с неидеальной надежностью, то задачу определения показателей надежности необходимо решать с учетом этого фактора.

Теория

Для учета надежности системы контроля предполагается, что система контроля допускает ошибки I, II и III рода [1, 2]. Задача заключается в расчете показателей надежности при условии возникновения отказа не только линии связи, но и системы контроля за ее работоспособностью. Для этих условий состояния контролируемого сетевого элемента (линии связи) представлены на графе состояний рисунка 3.

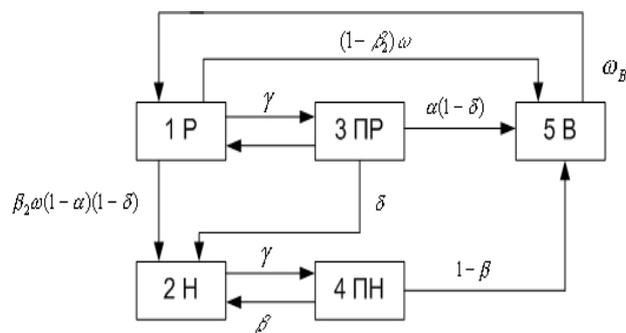


Рис.3. Граф состояний сетевого элемента

В граф состояний введены обозначения состояний, аналогичные обозначениям, принятым на рис.1.

Переходы между состояниями учитывают надежность системы контроля. В связи с предполагаемым присутствием ошибок системы контроля введены параметры: вероятность ошибки I рода (α), вероятность ошибки II рода (β), вероятность ошибки контроля III рода (δ), а также вероятность ошибки II рода (β_2), при условии того, что имел место отказ, обнаруженный системой непрерывного контроля. Через символичные значения ω и ω_B обозначены интенсивность отказов и восстановлений.

Аналогично графу состояний наблюдаемых событий (рис.2) составлен граф состояний СЭ в процессе эксплуатации (рис.4).

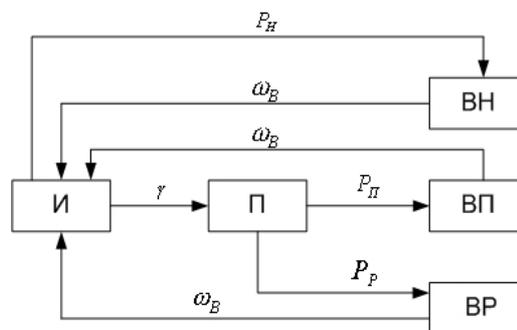


Рис.4. Граф состояний СЭ в процессе эксплуатации

Предполагается, что отказы, обнаруживаемые системой непрерывного и периодического контроля, несовместны и независимы. Также предполагается, что имеют место ошибки контроля, но на графе состояний рисунка 4 это не отражается. Фиксируется лишь состояние того, что на восстановлении находится работоспособное устройство (P_P) из-за ошибки системы контроля I рода.

Решение задачи расчета реальных показателей надежности с учетом всех вышеприведенных рассуждений заключается в совместном рассмотрении математической и эксплуатационной моделей [3,4].

В табл.1 приведены типы показателей надежности и формулы для их оценок и расчета. Показатели надежности условно разделены на эксплуатационные, которые могут наблюдаться в процессе эксплуатации, и исходные, т.е. теоретические показатели. В табл.1 плюс показана принадлежность показателя к эксплуатационному или исходному типу. В табл.2 приведены формулы для расчета вероятностей попадания в состояния восстановления. Расчетные формулы основаны только на статистических данных системы контроля.

В табл. 1 и 2 обозначено суммарное время пребывания СЭ в рабочей конфигурации (T_H), время восстановления (T_B), число выполненных проверок (N_B), число восстановлений с отказом, обнаруживаемым соответствующим видом контроля (N_H , N_{II}) и число ошибочных восстановлений (N_P).

Сопоставив полученные расчетные формулы для графа рис.1 с формулами из табл.1 и 2, получаем систему уравнений (1):

$$\left. \begin{aligned} P_H &= \omega_H / \omega_0, \\ P_{II} &= \gamma \omega_{II} / (\omega_0 (\omega_H + \gamma)), \\ n_{II} &= (\gamma (\omega_0 + \gamma)) / (\omega_0 (\omega_H + \gamma)). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) дополнительно получена формула для расчета среднего, на одно восстановление, числа проверок (n_{II}).

Преобразуем систему уравнений (1):

$$\left. \begin{aligned} \omega_0 &= \gamma / (n_{II} - P_{II}), \\ \omega_H &= (\gamma (1 - P_{II})) / n_{II}, \\ \omega_{II} &= \omega_0 - \omega_H. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\omega_0 = \omega_H + \omega_{II}$ — суммарная интенсивность отказов линии связи.

Таблица 1

Типы показателей надежности

Наименование	Обозначение	Исходные	Эксплуатационные	Расчетные формулы
Интенсивность отказов	ω	+	—	—
Интенсивность восстановлений	ω_B	+	+	N_B/T_B
Интенсивность периодической проверки	γ	+	+	$N/T_{\text{И}}$
Вероятность ошибки I рода	α	+	—	—
Вероятность ошибки II рода	β	+	—	—
Вероятность ошибки III рода	δ	+	—	—

Таблица 2

Типы вероятностей

Наименование	Обозначение	Исходные	Эксплуатационные	Расчетные формулы
ВН	$P_{\text{Н}}$	—	+	$N_{\text{Н}}/N_B$
ВП	$P_{\text{П}}$	—	+	$N_{\text{П}}/N_B$
ВР	$P_{\text{Р}}$	—	+	$N_{\text{Р}}/N_B$
ВНП	$P_{\text{НП}}$	—	+	$N_{\text{НП}}/N_B$

Таким образом, получили расчетные формулы для определения интенсивности отказов по эксплуатационным показателям, что позволяет дать оценку работы СЭ и принимать решения, например, о реконфигурации сети, внесении изменений в процесс маршрутизации и другие задачи системы управления.

Результатом аналогичных вычислений с учетом неидеальной надежности (рис.3) стали следующие расчетные формулы:

$$K_{\text{П}} = \frac{\omega_B [\gamma\delta + \beta_2\omega] + (1-\beta)[\omega + \gamma(\alpha + \delta - \alpha\delta)]}{\omega_B [\gamma\delta + \beta_2\omega + (\omega + \gamma)(1-\beta)] + (1-\beta)[\omega + \gamma(\alpha + \delta - \alpha\delta)]};$$

$$t_{\text{Н}} = \frac{\gamma\delta + \beta_2\omega}{\gamma(1-\beta)[\omega + \gamma(\alpha + \delta - \alpha\delta)]}.$$

Очевидно, что $K_{\text{П}}$ и $t_{\text{Н}}$ зависят от вероятностей ошибок периодического контроля α , β , γ и вероятности ошибки непрерывного контроля β_2 . Для их определения был использован граф состояний СЭ в процессе эксплуатации (рис.4).

Аналогично предыдущим расчетам получаем систему уравнений (3):

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{Н}} &= \frac{(1-\beta_2)\omega}{\omega + \gamma(\alpha + \delta - \alpha\delta)}, \\ P_{\text{Р}} &= \frac{(\alpha\gamma(1-\delta))}{\omega + \gamma(\alpha + \delta - \alpha\delta)}, \\ P_{\text{П}} &= \frac{(\delta\gamma + \beta_2\omega)}{\omega + \gamma(\alpha + \delta - \alpha\delta)}, \\ n_{\text{П}} &= \frac{\beta_2\omega + \gamma(1-\beta + \delta)}{(1-\beta)(\omega + \gamma(\alpha + \delta - \alpha\delta))}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Полученная система уравнений демонстрирует возможность определения вероятностей через эксплуатационные показатели с учетом надежности системы контроля. Для дальнейших расчетов исключаем одну формулу, поскольку сумма вероятностей, входящих в состав системы уравнений, равна единице. Дальнейшие преобразования зависят от того, какие собственно неизвестные показатели требуется определить. В системе уравнений (3) есть четыре неизвестных параметра — это α , β , β_2 , δ . Определить же можно только три из них. Какие именно, зависит, например, от практического применения или имеющихся эксплуатационных данных. Если предположить, что $\delta = 0$, и ввести параметр $\rho_{\gamma} = \frac{\gamma}{\omega}$, то система уравнений (1) будет иметь следующее решение:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{P_{\text{Р}}}{(1-P_{\text{Р}})\rho_{\gamma}}, \\ \beta_2 &= \frac{P_{\text{П}}}{(1-P_{\text{Р}})\rho_{\gamma}}, \\ \beta &= \frac{P_{\text{П}}}{n_{\text{П}} - \rho_{\gamma}(1-P_{\text{Р}})}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Практическая реализация

По полученным формулам систем уравнений (1)–(4) можно проследить зависимость между эксплуатационными и расчетными параметрами надежности, определить реальное время нахождения сетевого элемента в неработоспособном состоянии и при

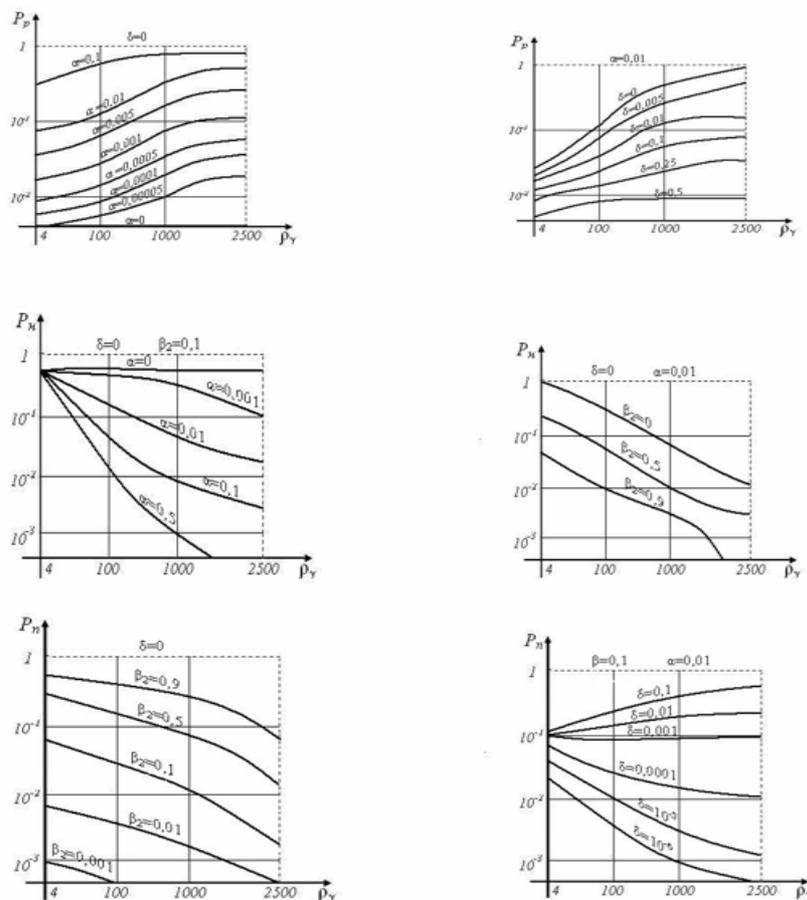


Рис.5. Графики зависимости

этом неисключенным из рабочей конфигурации, дать оценку работе служб восстановления и контроля. В приведенных расчетах число уравнений, как правило, меньше числа вводимых неизвестных переменных, поэтому решение каждой задачи требует индивидуального подхода. Например, нецелесообразно пренебрегать ошибкой контроля III рода, если требуется дать оценку работе персонала, отвечающего за техническое состояние системы. В отдельных случаях есть возможность пренебречь ошибкой I рода ($\alpha=0$).

Для практической реализации полученных теоретических результатов была составлена программа имитационного моделирования [5,6]. В программу введены исследуемые математические модели и расчетные системы уравнений. В качестве исходных данных был взят участок сети, включающий 100 единиц однотипного сетевого элемента. Интенсивность тестирования (периодический контроль) каждого составила $\gamma = 0,04 \text{ ч}^{-1}$. Период наблюдения для сбора статистических данных составил три месяца.

Программа позволяет не только выполнить расчет требуемых показателей, но и прогнозировать результаты исследований, а также выводить на экран монитора различные графики в зависимости от вводимых исходных статистических данных. На рис.5 показан пример графиков зависимости вероятностей

(табл.2) от параметра ρ_γ . Исследование проводилось при разных значениях α , δ , β и β_2 .

Приведенные на рис.5 графики демонстрируют разные возможности определения степени достоверности работы систем контроля. В указанном примере исследования проводились при условии, что интенсивность отказов лежит в пределах от 1×10^{-5} до $0,1 \text{ час}^{-1}$. Возможность и выбор пути определения вероятностей (табл.2) зависят от наличия и объема статистических данных на момент проведения оценки надежности сетевого элемента или системы контроля.

Заключение

В современных условиях функционирования инфокоммуникационных систем и сетей связи надежность занимает особое место, поскольку это один из основных показателей, который отвечает за гарантированную доставку информации, качество предоставления телекоммуникационных услуг потребителю [7]. Но, как известно, надежность — это свойство системы сохранять свою работоспособность в течении заданного временного интервала [1,2]. Показателей, характеризующих это свойство, достаточно большое количество. Они определены в соответствующих документах, национальных стандартах, рекомендациях ИТУ-T, нормативно-технической документации и т.п. Поэтому повы-

шенное внимание при проектировании, реализации систем связи уделяется организации системы мониторинга за их работоспособностью и надлежащим выполнением технических функций. Основу системы мониторинга составляет система контроля. Однако, принимая во внимание, что система контроля также является сложным техническим объектом, следует учитывать и то, что она подвергается тем же внешним и внутренним воздействиям, что и контролируемый объект. Значит, есть необходимость в оценке ее надежности и качестве выполняемых функций. В статье приведены математические модели, отражающие состояния сетевого элемента с точки зрения как выполняемых внутрисистемных функций в процессе эксплуатации, так и состояний, фиксируемых в процессе восстановления. В качестве практической реализации предлагается программный продукт, позволяющий моделировать исходные данные для расчетных формул и получения графиков для прогнозирования результатов проводимых исследований на надежность инфокоммуникационных систем. Приведена теоретическая основа для решения подобных задач.

1. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Термины и определения. М., 1990. 24 с.
2. ГОСТ Р 53111-2008 Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. М.: Стандартинформ, 2008. 20 с.
3. Шерстнева А.А. Оценка параметров одномерного и двумерного распределения случайных величин // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2020. №5(121). С.63-67. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5\(121\).63-67](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5(121).63-67)
4. Вилков А.П., Родионова Т.Е. Использование систем одновременных уравнений для получения моделей описания технических объектов // Современные проблемы

проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. 2016. №10. С.175-177.

5. Шерстнева О.Г., Шерстнева А.А. Программа имитации функционирования телекоммуникационной сети с учетом реальных показателей надежности. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №17760. 29.12.2011.
6. Wickham H. *Elegant graphics for data analysis*. 2nd ed. Springer, 2016. 213 p.
7. Еременко В.Т. Методы и модели теории телетрафика. Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019. 244 с.

References

1. GOST 27.002–1989. Nadezhnost' v texnike. Terminy' i opredeleniya [State Standard 27.002–1989. Reliability in technology. Terms and Definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 1990. 24 p.
2. GOST R 5311–2008 Ustojchivost' funkcionirovaniya seti svyazi obshhego pol'zovaniya. Trebovaniya i metody' proverki [State Standard R 5311–2008. Stability of public communication network functioning. Requirements and verification methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 20 p.
3. Sherstneva A.A. Otsenka parametrov odnomernogo i dvumernogo raspredeleniya sluchaynykh velichin [Parameters estimation of one-dimensional and two-dimensional distribution of random variables]. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta – Vestnik NovSU*, 2020, no. 5 (121), pp. 63-67. doi: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5\(121\).63-67](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5(121).63-67)
4. Vilkov A.P., Rodionova T.E. Ispol'zovanie sistem odnoveremnykh uravneniy dlya polucheniya modeley opisaniya tekhnicheskikh ob'ektov [Using systems of simultaneous equations to obtain models for describing technical objects]. *Sovremennye problemy proektirovaniya, proizvodstva i ekspluatatsii radiotekhnicheskikh sistem – Modern problems of design, production and operation of radio systems*. 2016, №10, pp.175-177.
5. Sherstneva O.G., Sherstneva A.A. Programma imitacii funkcionirovaniya telekommunikacionnoj seti s uchedom real'ny'x pokazatelej nadezhnosti. Svidetel'stvo o regostracii e'lektronnogo resursa, no. 17760. 29.12.2011.
6. Wickham H. *Elegant graphics for data analysis*. 2nd ed. Springer, 2016. 213 p.
7. Eremenko V.T. Metody i modeli teorii teletrafika [Teletraffic theory methods and models], OGU imeni I.S. Turgeneva – Orel State University, 2019. 244 p.